

Заключение

Отдел акустического каротажа ООО “Нефтегазгеофизика” проводит работы по обеспечению производственных организаций России современными надежными технологиями акустических исследований скважин. Эти работы охватывают весь спектр возможных применений: термобарические условия и диаметры бурения. Один из главных приоритетов – повышение точности и надежности определения геологических параметров. Эти задачи решаются путем комплексирования различных методов. Одним из комплексов является сочетание волнового акустического каротажа и высокочастотного сканирования (акустического телевидения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Ю. И. Акустический каротаж как возможный метод исследований трещиноватости горных пород // Труды ВНИГРИ. 1962. Вып. 193. С. 118–131.
2. Смирнов Н. А. и др. Акустический каротаж с использованием монопольных и дипольных преобразователей: регистрируемые волны, решаемые задачи и полученные результаты // Сборник тезисов международной геофизической конференции и выставки ЕАГО, EAGE, SEG. М., 1997.
3. Смирнов Н. А., Варыхалов А. С., Пивоварова Н. Е. Определение технического состояния обсадки скважины методом акустического сканирования // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 4 (226). С. 40–52.
4. Kurkjian A. L. Radiation from a Low Frequency Horizontal Acoustic Point Force in a Fluid-filled Borehole. SEG 54th Ann. International Meeting, 1984. P. 5–7.
5. Smirnov N. A., Varykhakov A. S. Determination of Horizontal Borehole Geometry by Ultrasonic Pulse-echo Method. SPE 117430, 2008.
6. Winbow G. A., Rice J. A. Theoretical Performance of Multipole Sonic Logging Tools. SEG 54th Ann. International Meeting, 1984. P. 37–40.
7. www.karotazh.ru. Сайт ООО “Нефтегазгеофизика”.

*Рукопись рассмотрена на научно-техническом совете
ООО “Нефтегазгеофизика” и рекомендована к публикации*

УДК 550.85

Н. Г. Козыряцкий
ООО “Нефтегазгеофизика”

СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ АБСОЛЮТНОЙ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ КЕРНА

Рассматриваются результаты внедрения и эксплуатации стандартных образцов абсолютной газопроницаемости, изготовленных на основе металлических порошков и спеченного порошка корунда, для метрологического обеспечения петрофизических исследований фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород-коллекторов.

Ключевые слова: петрофизика, метрология, абсолютная газопроницаемость, металлические порошки, спеченный корунд, стандартные образцы.

Одним из основных средств достижения необходимой точности и достоверности результатов измерений при петрофизических исследованиях (ПФИ) является высокий научно-технический уровень метрологического обеспечения (МО) средств и технологий измерений, используемых при ПФИ, в связи с чем МО ПФИ должно быть неотъемлемым элементом всей технологической цепи изучения горных пород, начиная от отбора и привязки кернового материала и заканчивая его хранением.

При этом соблюдение требований обеспечения единства и достоверности измерений при ПФИ достигается, в том числе, наличием системы эталонов, образцовых средств измерений, предназначенных для воспроизведения, хранения и передачи единиц измеряемых при ПФИ физических величин или определяемых параметров образцов горных пород и флюидов, их насыщающих.

Сказанное в полной мере относится и к такому достаточно масштабному виду ПФИ, как измерение абсолютной газопроницаемости керна (в дальнейшем по тексту – проницаемости).

Как и любой измерительный процесс, измерения проницаемости обязательно должны сопровождаться оценкой их погрешности. Если подобная оценка не проведена или выполнена не на соответствующем уровне, информация, полученная при измерении проницаемости,

может оказаться непригодной для определения конечных результатов интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС).

К сожалению, современное состояние парка технических средств и нормативной базы МО измерений газопроницаемости не всегда позволяют дать исчерпывающую информацию об их точности и достоверности.

В качестве иллюстрации этого тезиса в табл. 1 приведены сведения о нормировании погрешностей для некоторых рабочих средств измерения проницаемости, из которых видно, что для абсолютного большинства средств измерений проницаемости погрешность не нормируется, что затрудняет оценку достоверности измерений.

Таблица 1
Метрологические характеристики средств измерений проницаемости

Тип аппаратуры	Диапазон измерения проницаемости, мД	Погрешность измерения проницаемости
Геопрон ДС-30/100	0,1–3000	Не нормируется
Дарсиметр	0,01–3000	Не нормируется
Эпрон-ДС	0,01–3000	Не нормируется
Экопласт-Ф	0,01–3000	±5%
Петрозонд	0,1–2000	Не нормируется
Зондовый пермеаметр	0,2–5000	±5%
Проницаемостемер полуавтоматический	0,001–3000	Не нормируется
Установка для оценки газопроницаемости образцов горных пород УГПО (УГПО-1)	0,05–2500 (0,05–5400)	Не нормируется

Коэффициент проницаемости $k_{\text{пр}}$ является результатом совокупности косвенных измерений, что достаточно наглядно видно из выражения (1):

$$k_{\text{пр}} = \frac{Q \mu \Delta L}{\Delta p_{\text{пл}} F}, \quad (1)$$

где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент проницаемости породы; Q – объемный расход газа через образец породы; F – площадь фильтрации газа (примени-

тельно к цилиндрическим образцам горной породы – диаметр образца, применительно к образцам кубической формы – длина ребра куба); μ – динамическая вязкость газа при температуре измерений (справочная характеристика); $\Delta p_{\text{пл}}$ – перепад давления на входе и выходе образца породы; ΔL – длина фильтрующей среды (длина образца).

При этом следует иметь в виду, что некоторые из перечисленных параметров, в свою очередь, тоже являются результатом косвенных измерений других параметров (например, расход газа является результатом измерений объема газа, прошедшего через образец за определенное время; объем газа иногда измеряется как расстояние, пройденное поверхностью (мениском) жидкости в пьезометре и т. д.).

Указанное обстоятельство делает достаточно сложной и долговременной процедуру оценки погрешности аппаратуры для определения проницаемости горных пород.

Достаточно подробно эта процедура описана в [3] и [7]. При соблюдении нормируемых условий измерений и рекомендуемых в [3] и [7] общетехнических средств измерений, входящих в аппаратуру для определения проницаемости, суммарная относительная погрешность определения коэффициента проницаемости находится в диапазоне

$$k_{\text{пр}} = 1,25 \cdot (4,3–6,6) \%. \quad (2)$$

Коэффициент 1,25 в выражении (2) – коэффициент запаса, учитывающий возможное старение отдельных средств измерений, неконтролируемое изменение условий измерений и другие неблагоприятные факторы.

В методическом плане оценка погрешности аппаратуры для определения проницаемости сводится к периодической поверке в территориальных органах Росстандарта общетехнических средств измерений (мер), входящих в состав аппаратуры и используемых при подготовке образцов горных пород к исследованиям: манометров; средств линейных измерений (штангенциркули, линейки); термометров; секундомеров и т. д.

Это обстоятельство делает обслуживание аппаратуры достаточно дорогостоящим мероприятием и связано со значительным временем исключения ее из эксплуатации.

Более производительной и менее дорогостоящей является методика оценки погрешности аппаратуры с помощью стандартных образцов (СО) проницаемости.

Стандартные образцы проницаемости представляют собой физические модели сред, как правило, пористых. Изготавливаются они из материалов, инертных к воздействию окружающей среды и технических жидкостей, применяемых при петрофизических исследованиях. Стандартные образцы позволяют многократно воспроизводить в заданных пределах необходимые физические свойства реальных образцов горных пород в течение достаточно длительного (до пяти лет) межповерочного (межкалибровочного) интервала времени без изменения своих основных метрологических характеристик.

Пионером в области создания системы МО проницаемости на основе стандартных образцов можно считать ВНИИГИС, где были впервые разработаны и изготовлены государственные стандартные образцы газопроницаемости ГСО-ГП, предназначенные для калибровки лабораторных установок измерения проницаемости. Материалом для изготовления ГСО-ГП служили стеклянные фильтры по ГОСТ 9775 [3]. В комплект поставки ГСО-ГП входили 5 образцов диаметром 29,5 мм, длиной от 25 до 40 мм с аттестуемыми значениями коэффициента проницаемости в следующих интервалах: 0,01–2,30; 0,37–7,30; 3,70–73,0; 25,0–500,0; 250–4500 мД.

Заявленная погрешность аттестации ГСО-ГП составляет не более $\pm 2,5\%$. Было изготовлено два комплекта ГСО-ГП, и дальнейшие работы были прекращены в связи с трудностями создания образцовой поверочной установки для метрологической аттестации ГСО-ГП.

Весьма ограниченное распространение получили отраслевые стандартные образцы газопроницаемости огнеупорных изделий ОСО-ГП (разработка ВостИО, г. Екатеринбург, 1983 г.), предназначенные для контроля точности результатов измерения коэффициента абсолютной газопроницаемости пористых сред, преимущественно огнеупорных изделий, и изготовленные из белого электрокорунда по ОСТ 2М171-5-78. Геометрия образцов – цилиндры диаметром 36 мм и высотой 50–75 мм. Интервал воспроизводимых значений проницаемости 4000–15000 мД. Аттестованное значение установлено с относительной погрешностью, не превышающей $\pm 2,5\%$. Отсутствие ОСО-ГП с малыми значениями газопроницаемости, представляющими для петрофизических лабораторий существенно больший интерес, чем значения проницаемостей в несколько тысяч миллидарси, а также не вполне подходящий диаметр образцов ОСО-ГП (абсолютное большинство лабораторного оборудования для ПФИ предназначено для

работы с образцами диаметром 30 мм) стали препятствием для их широкого внедрения.

В начале 1990-х годов во ВНИГИКе был выполнен ряд НИР по созданию технической и нормативной базы МО ПФИ. Работы включали, помимо прочего, разработку стандартных образцов проницаемости (СО-ГП) на основе различных материалов и веществ, приемлемых для лабораторных исследований.

На первом этапе выполнения этих работ совместно со специалистами Белорусского республиканского НПО порошковой металлургии (г. Минск) были разработаны и изготовлены опытные исследовательские образцы проницаемости с использованием технологий порошковой металлургии. При этом кроме требований к механической прочности образцов, стабильности их характеристик во времени и удобству эксплуатации, учитывались и специфические требования к образцам. Ожидаемый диапазон воспроизводимых значений газопроницаемости должен был охватывать значения от 0,1 до 5000 мД, что соответствует диапазону реально получаемых значений проницаемости на естественном керновом материале. Форма образцов должна была быть цилиндрической с диаметром и высотой не более 30 мм, что соответствует параметрам кернодержателей лабораторного оборудования. Это, однако, не должно было ограничивать разработку стандартных образцов большего диаметра – до 80 мм и более, так как ПФИ все чаще проводятся также и на крупноразмерном керне.

В ряде оборудования для определения проницаемости реализуются принципы радиально-осевой и радиальной фильтрации газа, а также принцип прохождения газа через боковую поверхность образца, обеспечивая тем самым криволинейные пути фильтрации газа через образец. В связи с этим к структуре эталонных образцов проницаемости предъявляются достаточно жесткие требования, в первую очередь к их изотропности, а также механической прочности. Необходимость выполнения последнего требования обусловлена тем, что в кернодержателе на стандартный образец воздействуют значительные нагрузки, связанные с обжатием образца и подачей его в измерительную камеру, а так как эксплуатация стандартного образца предполагает многократное использование (в отличие от образцов керна), возможен его нежелательный механический износ.

Значения воспроизводимых стандартными образцами проницаемостей не должны зависеть от ориентации образца в кернодержателе.

В противном случае на образцы необходимо наносить специальные метки для их правильного расположения в кернодержателе, что в определенной мере усложняет их использование.

Пористые порошковые материалы на металлической основе (ППММ) обладают рядом достоинств: они достаточно прочны, устойчивы к воздействию коррозии, могут работать в широком диапазоне температур, обладают высокой тепло- и электропроводностью. Материалы на основе ППММ обладают широкими возможностями в варьировании основных параметров [1, 2]:

- пористость, %	5–98;
- диаметр пор, мкм	0,01–1000;
- удельная поверхность, м ² /г	0,01–100;
- предельная прочность при изгибе, МПа	30–330;
- предел прочности при растяжении, МПа	20–480;
- коэффициент проницаемости, м ² (мД)	10^{-16} – 10^{-8} (0,1–10 000).

Указанные характеристики зависят от формы и размеров частиц порошка, состояния их поверхности, способа и режима изготовления. Увеличение пористости материала и использование порошка со сферическими частицами и гладкой поверхностью приводят к увеличению газопроницаемости.

Существует несколько путей получения пористых СО, обеспечивающих воспроизведение необходимого для МО ПФИ диапазона значений проницаемости. Основным из них является создание СО на основе бипористых ППММ, характеризуемых двумя взаимопронизывающими друг друга системами пор, существенно отличающимися по размерам, а также метод покрытия частиц исходного порошка тонким слоем легкоплавкого металла. Оксиденные порошки или добавки оксидов в исходную шихту перед формированием позволяют получить прочные среднепористые материалы, пригодные для создания СО проницаемости.

Диапазон возможных значений воспроизводимых проницаемостей целесообразно разбить на несколько поддиапазонов (в почти “логарифмическом” масштабе) для выпуска СО газопроницаемости в виде комплектов: 1-й – 0,5–5; 2-й – 5–50; 3-й – 50–500; 4-й – 500–2000; 5-й – 2000–8000 мД.

Изменяя размер и форму частиц исходного порошка, давление прессования и температуру спекания, можно с приемлемой точностью

контролировать варьируемые значения проницаемости в заданных поддиапазонах.

На рис. 1 изображены СО газопроницаемости из комплекта поставки, включающего 5 образцов, номера СО на рисунке соответствуют номерам поддиапазонов воспроизводимых значений проницаемости.

В табл. 2 в качестве примера приведены реальные значения воспроизводимых проницаемостей для четырех комплектов СО. О значениях погрешностей воспроизведения проницаемости стандартными образцами можно судить по данным, приведенным в табл. 3 для выборочной группы стандартных образцов (группа сформирована из стандартных образцов, прошедших одновременную аттестацию).

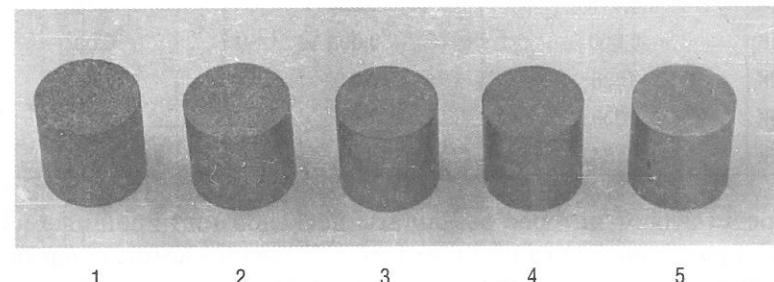


Рис. 1. Внешний вид стандартных образцов проницаемости на основе металлических порошков

Таблица 2
Значения проницаемостей, воспроизводимые стандартными образцами

Поддиапазон проницаемостей, мД	Значения проницаемостей, воспроизводимые СО, мД			
	Компл. № 1	Компл. № 2	Компл. № 3	Компл. № 4
0,5–5	0,9	2,9	4,5	2,6
5–50	9,9	15,8	9,1	7,3
50–500	149,2	155,6	133,7	162,4
500–2000	1480,0	1026,9	1484,1	940,1
2000–8000	6580,7	5626,3	7412,5	6595,9

Из табл. 3 вытекает, что СО с большими значениями газопроницаемости удается аттестовать с меньшими погрешностями, что подтверждает практический опыт исследований этой характеристики на образцах керна.

Таблица 3
Погрешности воспроизведения проницаемости стандартными
образцами на основе ППММ

№ СО	Воспроизводимая проницаемость, мД	Погрешность воспроизведения проницаемости	
		Абсолютная, мД	Относительная, %
Г11-1К	0,016	0,001	6,25
Г15-1К	0,050	0,003	6,00
Г61-2К	1888	50,0	2,65
Г62-1К	2030	55,0	2,71
Г55-1К	5154	14,0	0,27

Представляют интерес результаты исследований проницаемости на СО в различных организациях (табл. 4), анализ которых наглядно указывает на существование серьезных проблем в обеспечении единства измерений проницаемости в отрасли – расхождения в результатах межлабораторных измерений, достигающие 80%, приемлемыми признать нельзя.

Резюмируя вышесказанное, можно утверждать, что пористые материалы, изготовленные методом порошковой металлургии, могут быть использованы для изготовления СО проницаемости, обеспечивающих перекрытие диапазона ожидаемых значений проницаемости керна и обладающих удовлетворительной стабильностью своих характеристик.

Следует также упомянуть о разработках в области создания СО проницаемости на основе ППММ, выполненных в НТЦ “Амплитуда” (г. Зеленоград). Рамки настоящей статьи не позволяют остановиться на их подробном описании, отметим только, что в этой организации были созданы цилиндрические СО диаметрами от 25 до 100 мм и длинами от 30 до 90 мм, а также СО кубической формы с широким диапазоном воспроизводимых значений проницаемости.

Таблица 4

№ СО	Результаты межлабораторных исследований СО проницаемости				Максимальные отклонения от среднего значения, %			
	Значения проницаемости, мД, полученные в лабораториях ВНИИГАЗ ВНИИГИК ВНИИГИС ЦНИИЛ (Тюмень-геология) ЗапСибНИИГИ	Среднее значение по лабораториям, мД						
2-1	–	2,0	2,4	–	0,44	0,46	1,33	+80,5; -66,9
K11197	2,7	–	1,4	2,2	–	–	2,45	+10,2; -10,2
K10943	5,7	5,3	7,2	5,8	–	–	6,00	+20,0; -11,7
2-2	–	4,4	15,8	–	3,8	4,3	9,08	+74,0; -58,2
1	10,6	11,9	14,2	5,1	–	–	10,45	+35,9; -51,2
3	16,8	20,6	21,1	32,0	–	–	24,3	+45,4; -38,5
K10912	112,2	106,0	115,0	100,5	–	–	108,4	+6,10; -7,30
2-3	–	86,0	115,6	–	134,0	129,0	120,8	+10,9; -28,8
2	179,9	158,0	195,0	183,0	–	–	179,0	+8,90; -11,7
1'	225,8	395,0	452,0	494,0	–	–	391,8	+16,2; -42,4
2'	607,0	635,0	632,0	605,0	–	–	619,8	+2,50; -2,40
2-4	–	770	1027	–	936	1027	900	+14,1; -14,4

Еще один перспективный путь создания СО проницаемости – аттестация по коэффициенту проницаемости СО открытой пористости на основе корунда (СО открытой пористости (СО-ОП) достаточно подробно описаны в [5]). Эта идея привлекательна возможностью создания универсальных многопараметрических СО для МО петрофизического оборудования по одной исследуемой характеристике и многофункциональных петрофизических измерительных комплексов, таких, как, например, установка ИФЕС для исследования нескольких фильтрационно-емкостных свойств керна. В [6] описаны результаты исследований по созданию СО удельного электрического сопротивления на основе СО-ОП, здесь же изложены результаты исследований по созданию СО проницаемости на основе СО пористости, изготовленных из корунда. Внешний вид этих СО приведен на рис. 2, а в табл. 5 в качестве примера приведены диапазоны воспроизводимых стандартными образцами проницаемостей для разных поддиапазонов воспроизведения открытой пористости. Как видно из табл. 5, значение воспроизводимой проницаемости увеличивается с ростом воспроизводимой пористости, хотя анализ данных по 60 образцам не выявляет ни четкой аналитической, ни корреляционной зависимости между этими двумя параметрами (табл. 6). Это обстоятельство, в частности, затрудняет изготовление СО проницаемости на основе корунда с заранее заданными значениями проницаемости.

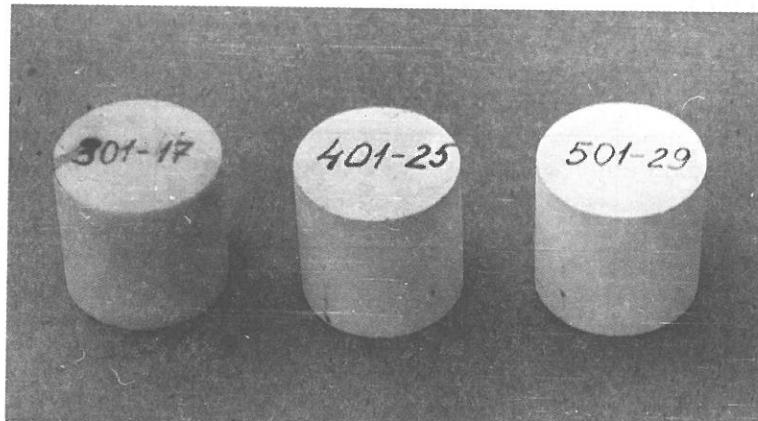


Рис. 2. Внешний вид стандартных образцов проницаемости на основе корунда

Таблица 5
Диапазоны воспроизводимых стандартными образцами проницаемостей для разных поддиапазонов воспроизведения открытой пористости

Пористость, %	Проницаемость, мД
1,51–5,00	0,0180–1,5375
17,01–20,20	0,4197–7,4280
25,10–34,60	0,7433–4,9800

Таблица 6
Сопоставление воспроизводимых значений открытой пористости и проницаемости стандартными образцами на основе корунда

Номер СО	Проницаемость, мД	Пористость, %
401-1	0,4197	19,28
301-13	0,4200	3,29
401-8	0,4200	18,64
301-57	0,4300	5,00
401-13	0,4700	19,12
301-48	0,4725	4,91
401-11	0,5275	20,03
301-87	0,5375	4,03
401-87	1,5050	17,01
501-68	1,5500	31,37

Так как образцы проницаемости из спеченного корунда подготовливались из стандартных образцов открытой пористости, то есть целевое назначение их было иное, чем контроль точности определения проницаемости, не удалось перекрыть весь или значительную часть диапазона проницаемости, присущего образцам керна, даже комплектом из 5–6 стандартных образцов. В то же время оказалось возможным подобрать образцы из корунда с очень низкими значениями проницаемости, которые не удается изготовить из материалов на основе ППММ. Очевидной становится рекомендация оснащать петрофизические лаборатории СО двух типов – из материалов на

основе ППММ и из спеченного корунда для перекрытия всего диапазона значений проницаемостей.

Сравнительные исследования стабильности характеристик образцов из ППММ и корунда показывают лучшую стабильность корундовых образцов по сравнению с металлическими.

Опыт эксплуатации СО проницаемости показал их высокую эффективность при контроле качества лабораторных исследований проницаемости керна.

Следует также отметить, что упомянутый ранее НТЦ “Амплитуда” также выпускает СО проницаемости на основе спеченного корунда. Образцы имеют как цилиндрическую форму с размерами 30×30 , 80×80 и 100×80 мм, так и кубическую форму с длиной грани 25 мм. Диапазон воспроизводимых газопроницаемостей – от 0,1 до 1000 мД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агге Х., Оцеток К. Металлокерамические фильтры, их изготовление, свойства и применение. Л.: Судпромгиз, 1959. 136 с.
2. Витязь П. А., Копцевич В. М., Шелег В. К. Пористые порошковые материалы и изделия из них. Минск: Высшая школа, 1987. 164 с.
3. ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации.
4. ГОСТ 9775-69. Фильтры стеклянные и изделия с фильтрами.
5. Козыряцкий Н. Г. Стандартные образцы для метрологического обеспечения измерений открытой пористости керна // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2009. Вып. 3 (180). С. 59–66.
6. Козыряцкий Н. Г. Экспериментальная оценка стабильности стандартных образцов удельного электрического сопротивления для петрофизических исследований // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2015. Вып. 1 (247). С. 84–91.
7. СТО ЕАГО 081-01. Породы горные. Методы определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации.

*Рукопись рассмотрена на научно-техническом совете
ООО “Нефтегазгеофизика” и рекомендована к публикации*

Результаты исследований и работ ученых и конструкторов

УДК 550.832

А. А. Веселков, М. А. Юматов,
С. А. Стрельцов, В. И. Журавлев
ООО “Нефтегазгеофизика”

КАБЕЛЬНО-АВТОНОМНЫЙ КАРОТАЖНЫЙ КОМПЛЕКС. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СКВАЖИННОЙ ЧАСТИ И ОБЩАЯ ЛОГИКА РАБОТЫ

Рассмотрены варианты устройства скважинных частей кабельных и кабельно-автономных комплексов геофизических исследований скважин и общие соображения по логической организации подобных устройств. Приведены описания структуры реализованных вариантов телеметрических модулей. Уделено внимание разработке кабельно-автономной системы.

Ключевые слова: каротаж, кабельно-автономная система, телеметрический модуль, кабельные линии.

За последние годы скважинные приборы значительно усложнились. Быстрый рост возможностей электроники позволил существенно улучшить эксплуатационные характеристики измерительных цепей приборов независимо от методов исследований. С другой стороны, появились возможности измерения ряда дополнительных параметров, что привело к росту объема данных, которые необходимо сохранять